

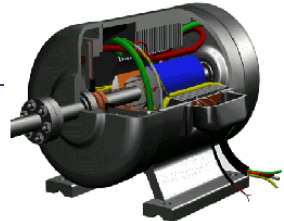
# 电机学

## 直流发电机和直流电动机

东南大学电气工程学院  
黄允凯



东南大学  
电气工程学院



1

自励发电机的电压建起

2

直流发电机的运行特性

3

直流电动机的机械特性和工作特性

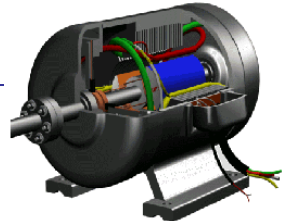
4

直流电动机的起动、调速和制动

5

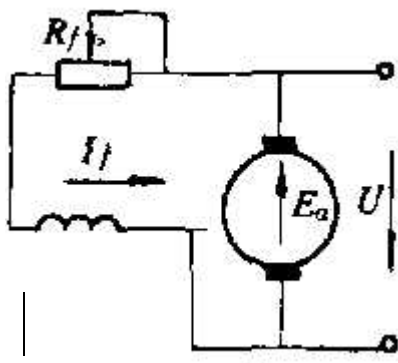
直流电机的换向和改善换向的方法





## 自励发电机的电压建立过程

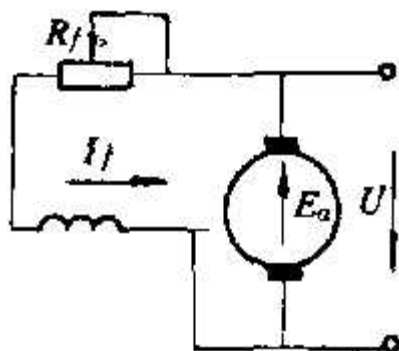
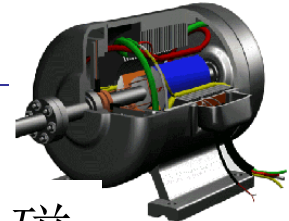
- 起动开始， $U=0$ ，励磁电流 $I_f=0$ 。
- 由于铁心存在剩磁，当电枢旋转时，电枢绕组中有小的感应电势（b点），在励磁绕组中产生微小的励磁电流 $I_{fb}$ 。
- 若 $I_{fb}$ 产生的磁势与剩磁同方向，则使磁场增强，电枢端电压随之增加，并产生更大的激磁电流。



$$U = I_f \sum r_f + L_f \frac{dI_f}{dt}$$

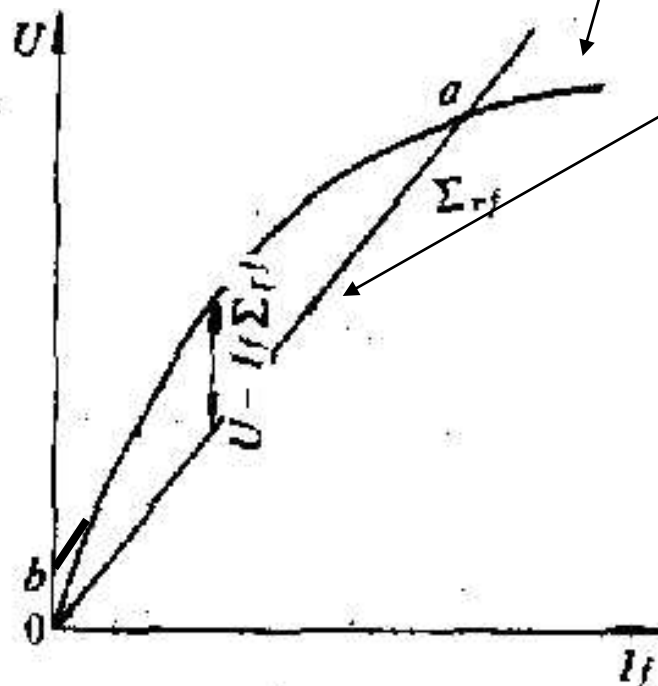


# 自励发电机的电压建起



$U_0 = E_0 = f(I_f)$  空载特性曲线（磁化曲线）

$U_0 = I_f \sum r_f$  励磁回路电压方程——场阻线



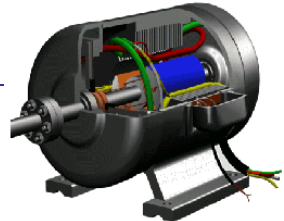
•在0a段，有

$$\frac{dI_f}{dt} = U - I_f \sum r_f > 0$$

即励磁电流随时间增加，对应端电压U也增加

•在a点达到稳定值，空载电压建立。





## 磁路的因素

### 1. 存在剩磁

### 2. 饱和现象

铁磁材料的饱和现象，使得磁化曲线与场阻线存在交点，即电机有确定的电压。

## 电路的因素

### 3. 励磁绕组的接法与电机旋转方向正确配合

使最初的微小励磁电流增强原来的剩磁，使感应电势增加

## 励磁回路的影响

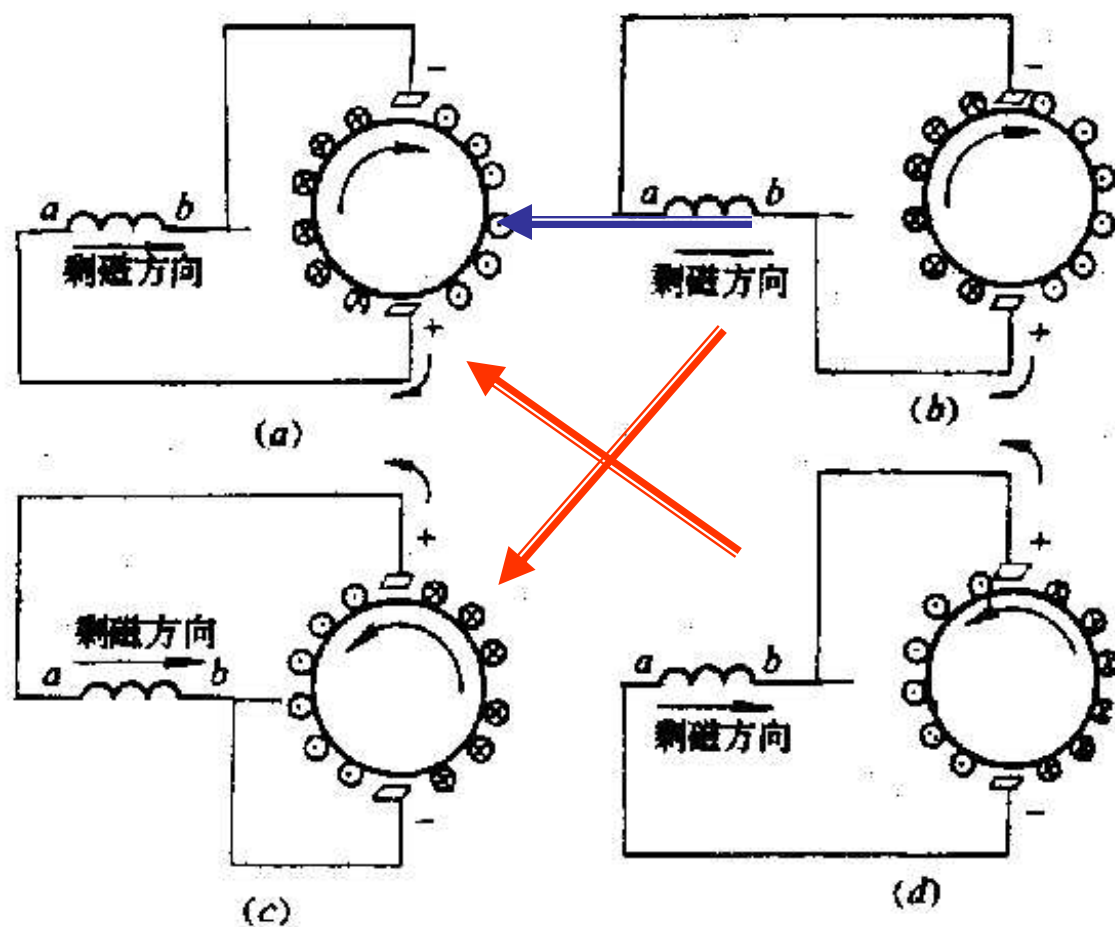
### 4. 励磁回路的总电阻小于该转速时的临界电阻

临界电阻指一定转速时，与磁化曲线的直线部分（气隙线）重合的场阻线





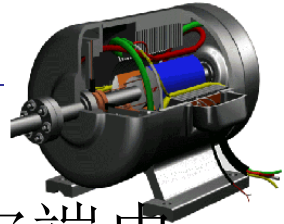
## 绕组接法与旋转方向



①改变电枢绕组与励磁绕组的相对连接

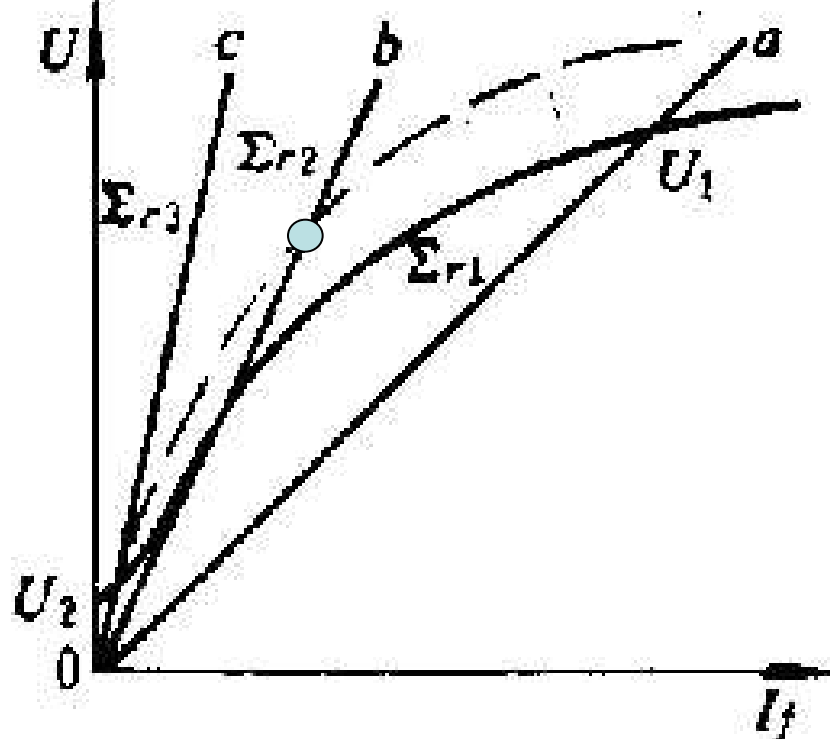
②改变电枢的旋转方向





## 转速与场阻线及稳定电压

$$\sum r_3 > \sum r_2 > \sum r_1$$



0a线，场阻 $r_1$ ，稳定端电压 $U_1$

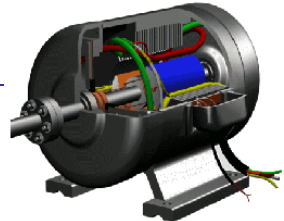
0c线，场阻 $r_3$ （较大），建立电压 $U_2$ 很小，**电压无法建立**

0b线，场阻 $r_2$ ，常阻线与气隙线重合，无明确的交点，电压不能稳定。且场阻的微小变化将引起端电压的较大变化

提高电机转速：

磁化曲线发生变化，如图中虚线，假设电机场阻不变，如果原临界场阻此时转速增加后临界场阻大于电机

**空载电压与励磁回路电阻的大小和电机转速高低有关。**



主要变量:

端电压 $U$ 、励磁电流 $I_f$ 、负载电流 $I_L$ 和电机转速 $n$

外特性:

$$U = f(I_L), I_f = \text{常数}$$

负载特性:

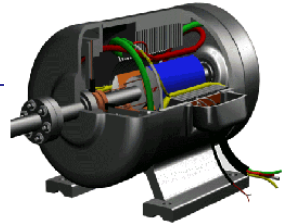
$$U = f(I_f), I_L = \text{常数}$$

调节特性:

$$I_f = f(I_L), U = \text{常数}$$

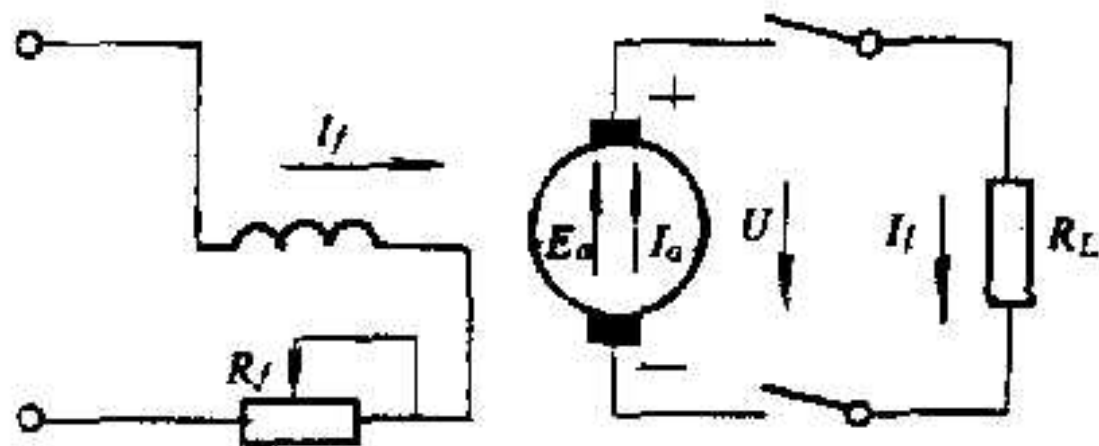






## 他励发电机的特性

- 励磁电流不随负载电流变化
- 励磁可调，电压调节范围大，适用于要求电压广泛可调的应用场合。工业上低压（4-24V）及高压（>600V）以上均为他励。

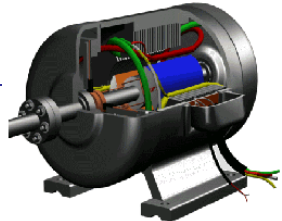


### 如何改变电机端电压极性？

取决于电枢电势的方向， $E_a = C_e \Phi n$

1. 改变转向，而磁通方向不变
2. 改变磁通方向，而转向不变





## 他励时的空载特性

$$U_0 = f(I_f), \quad I_L = 0$$

### 空载特性

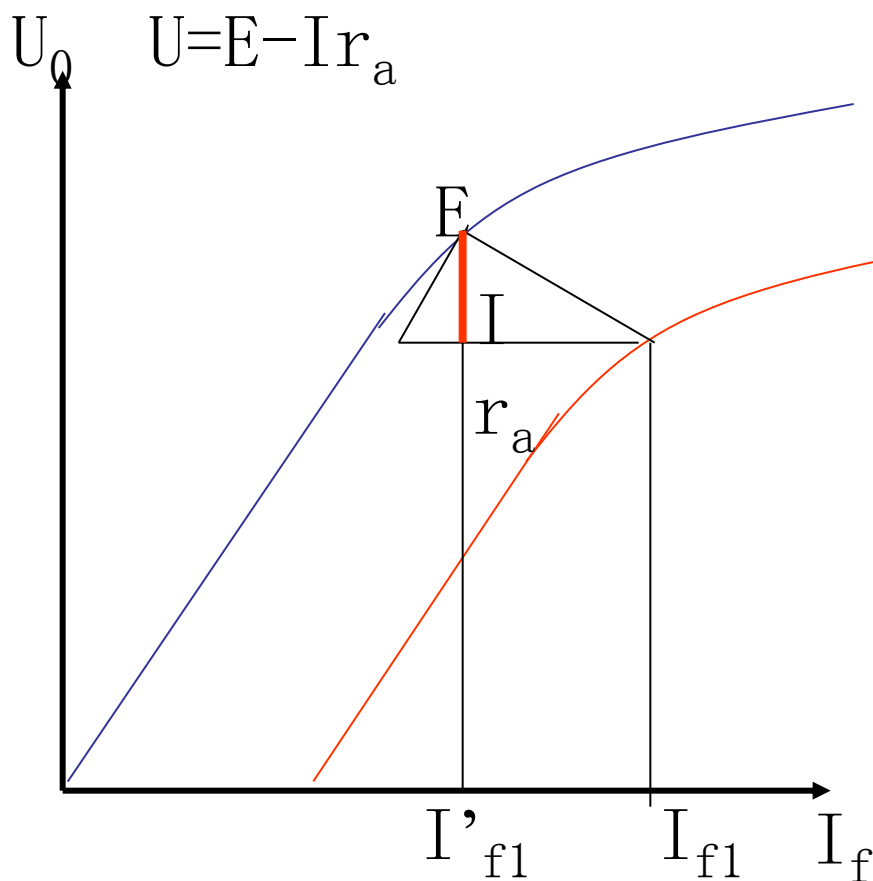
通过磁路计算，或空载实验得到。

即电机的磁化曲线

### 负载特性

假设电枢反应的去磁作用与负载电流成线性正比。

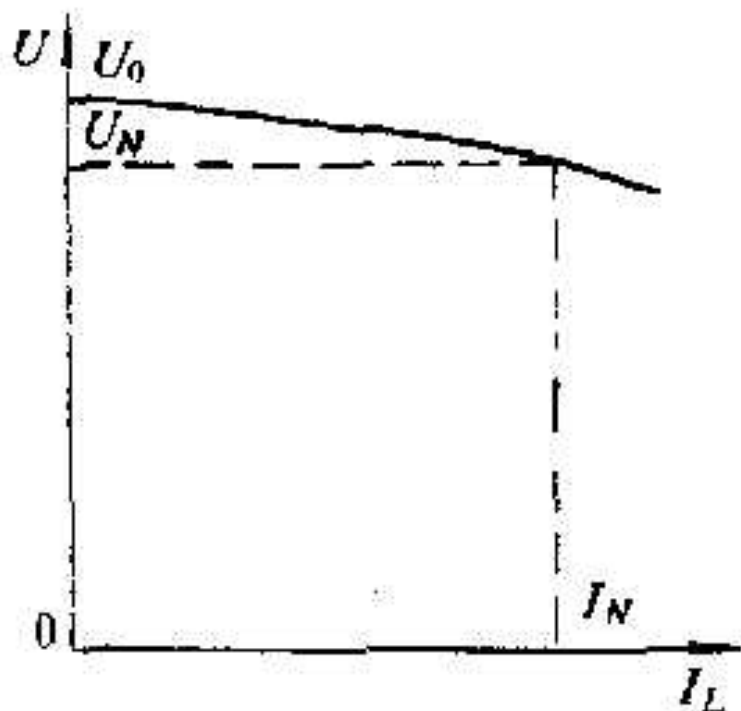
如电枢反应起助磁作用，则特性三角形应翻转，负载曲线比空载曲线高





## 他励时的外特性

$$U = f(I_L), \quad I_f = \text{const}$$



### • 端电压下降的因素：

- ① 电枢回路中引起的电压降
- ② 电枢反应的去磁作用

$$\text{电压变化率} = \frac{U_0 - U_N}{U_N}$$

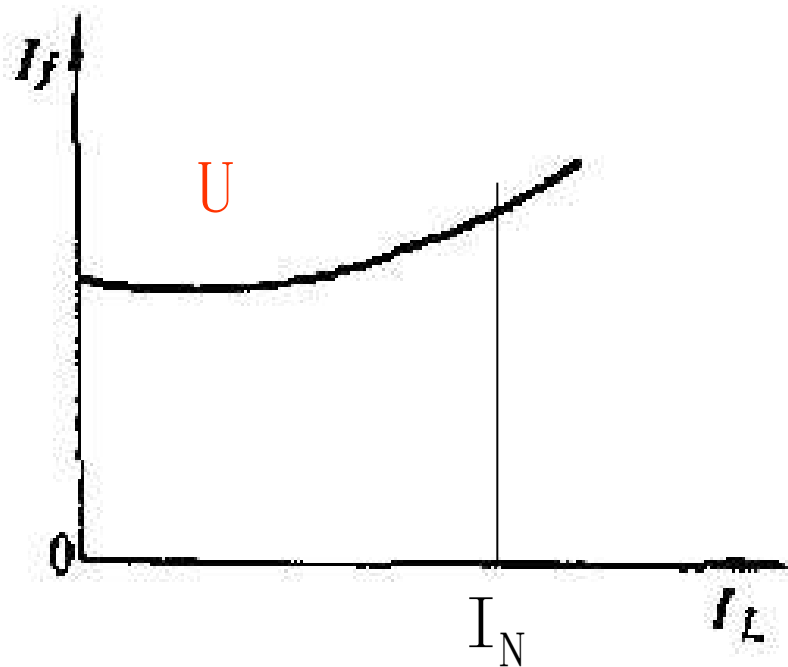
- 通常约为0.05—0.10





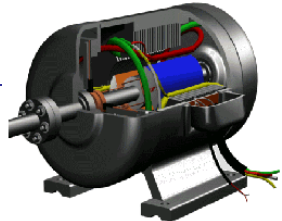
## 他励时的调节特性

$$I_f = f(I_L), \quad U = \text{const}$$



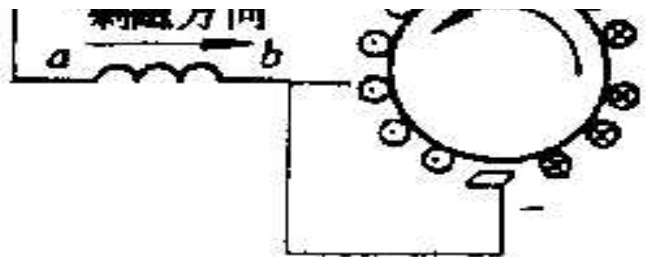
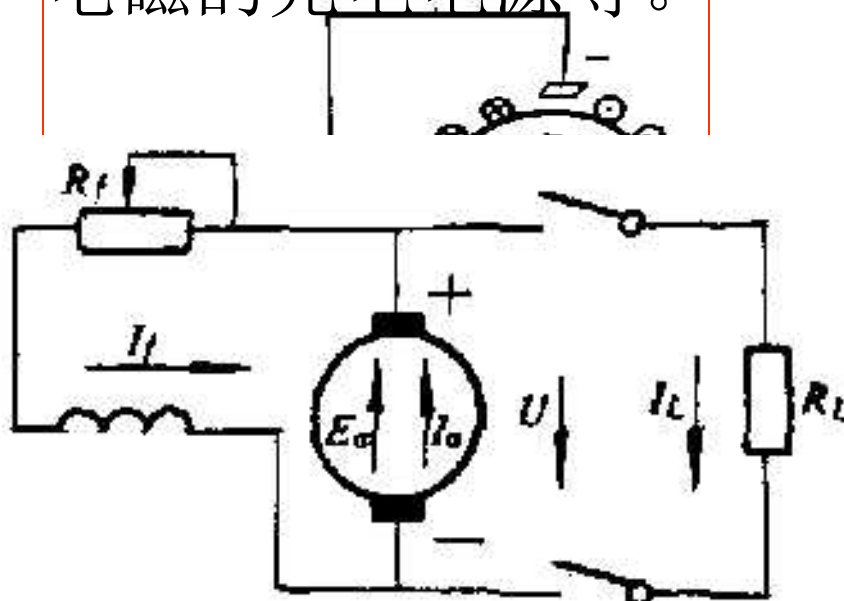
- 当有负载电流时，为要维持端电压不变，随着负载电流的增大，励磁电流相应增大





## 并励发电机的特性

- 励磁绕组与电枢绕组并联、励磁电流由发电机电枢绕组自己供给，随电枢电压变化
- 作为短线路的电源，如同步电机的励磁机、蓄电磁的充电电源等。



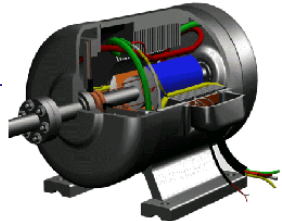
## 如何改变电机端电压极性？

取决于电枢电势的方向  
改变电刷间极性时应注意电压建立的问题。

即改变原动机转向时必须改变绕组的相对连接。

《使感应电势与剩磁方向一致》



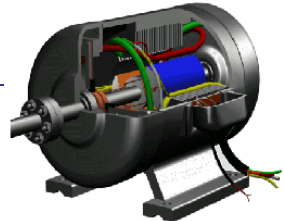


## 并励时的空载特性

$$U_0 = f(I_f = I_a), \quad I_L = 0$$

- 并励发电机在空载时，电枢电流等于励磁电流。由于励磁电流很小，它流过电枢绕组所产生的电阻压降和电枢反应很小，故空载时的感应电势即可认为是与空载端电压相等。所以，并励发电机的空载特性和它的磁化曲线相同



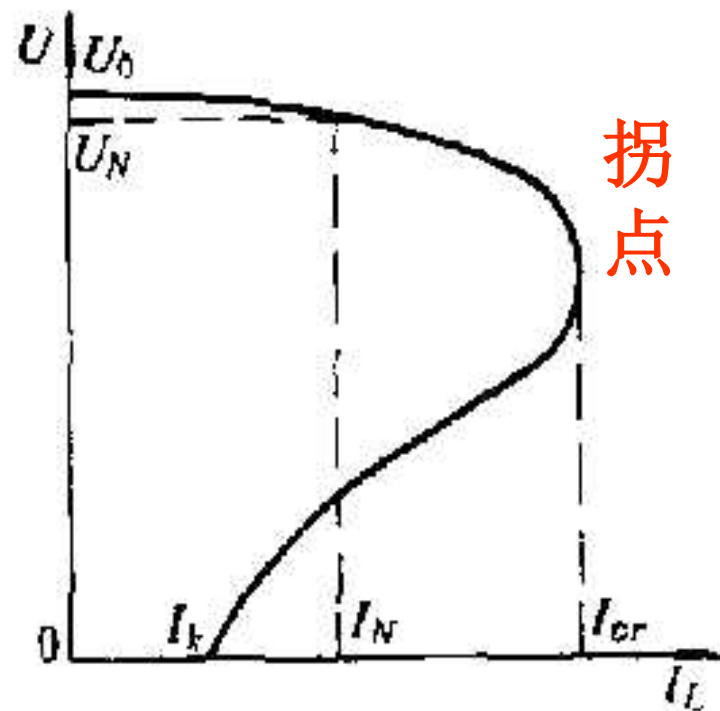


## 并励时的外特性

$$U = f(I_L), \quad I_f = \text{const}$$

### • 端电压下降的因素

- ①电枢回路的电压降；
- ②电枢反应的去磁作用；
- ③端电压下降引起的励磁电流减小。



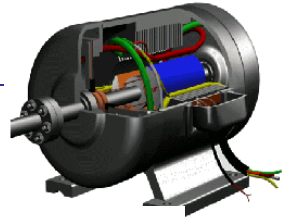
当负载电阻不断减小时，负载电流  $I_L$  增加。

但当降至某一临界数值  $I_{cr}$  以后，若负载电阻继续减小，则负载电流  $I_L$  反将逐渐减小。

当电枢两端直接短路，负载电流将降为微小的短路电流  $I_k$ 。

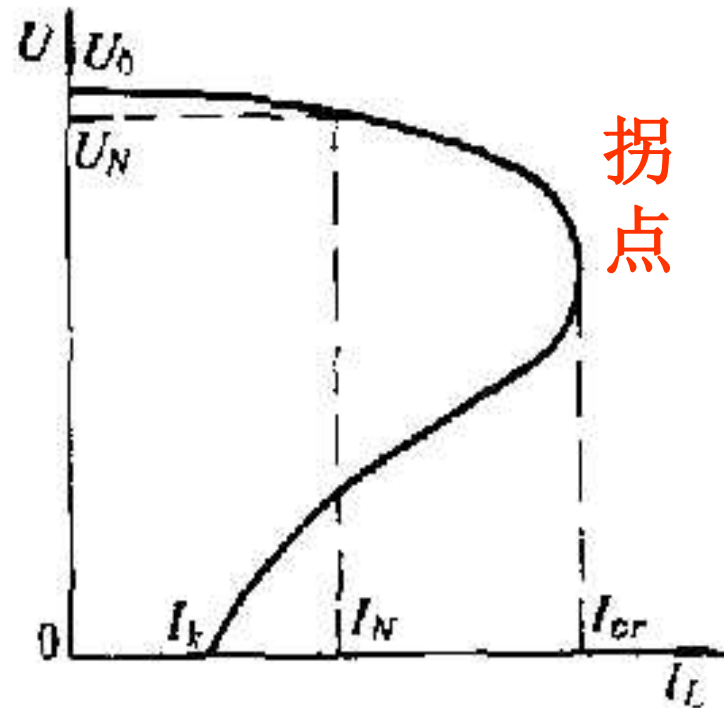


电压变化率约为20%



并励时的外特性  $U = f(I_L), I_f = \text{const}$

### 短路电流的解释:

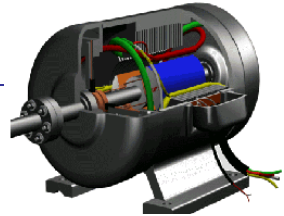


直接短路时，端电压 $U=0$ ，励磁绕组电压等于0。励磁电流为零，感应电势仅为剩磁电势，并引起短路电流。

短路的影响主要在于突然短路的瞬间：

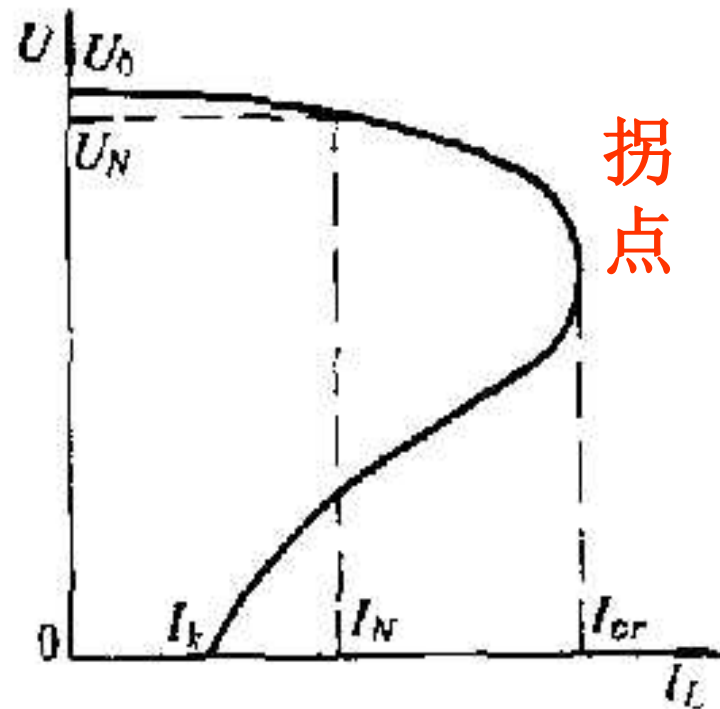
由于励磁绕组有很大的电阻，磁通不能立即变为零， $i_{\max}$ 可达8-12 $I_N$ 。





并励时的外特性  $U = f(I_L), I_f = \text{const}$

拐点产生的原因:



**拐点** 负载电阻减小后，一方面**使负载电流增加**，端电压下降；另一方面，端电压下降后，使励磁电流减小，电势下降，**使负载电流下降**。

当电压较高时，磁路饱和，励磁电流对电势影响不大；（负载电流随电阻下降而增大）

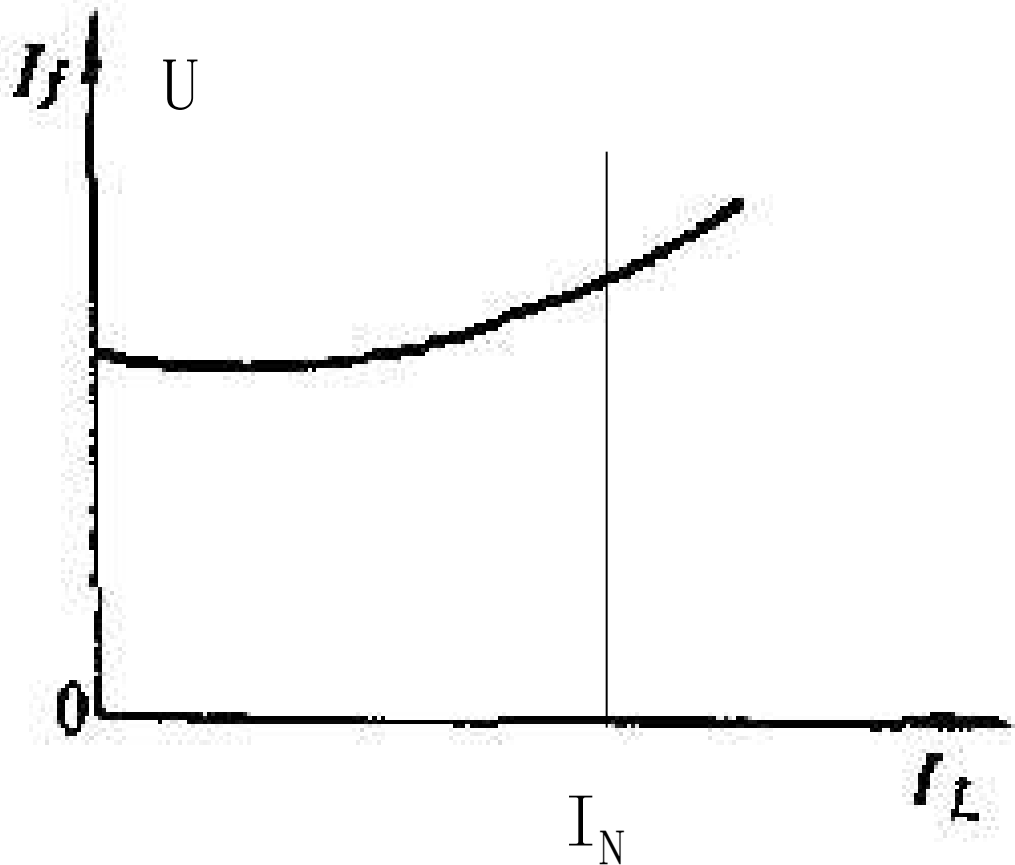
当电流达到临界值时，磁路退出饱和，励磁电流的微小变化引起感应电势的较大变化（负载电流下降）

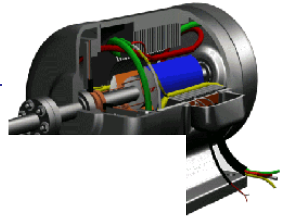




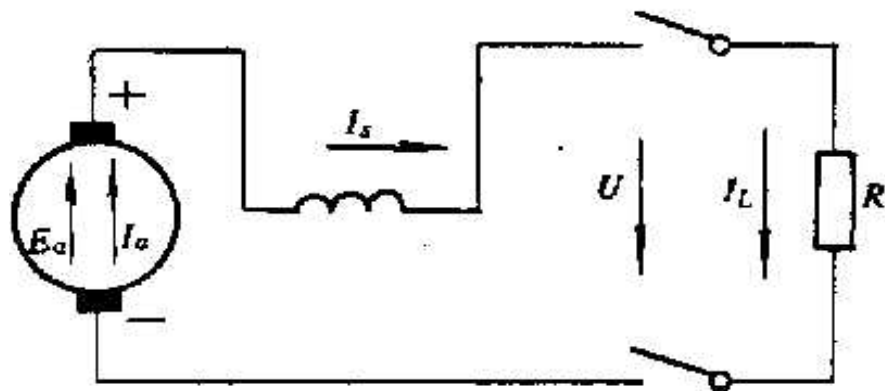
## 并励时的调节特性

$$I_f = f(I_L), \quad U = \text{const}$$





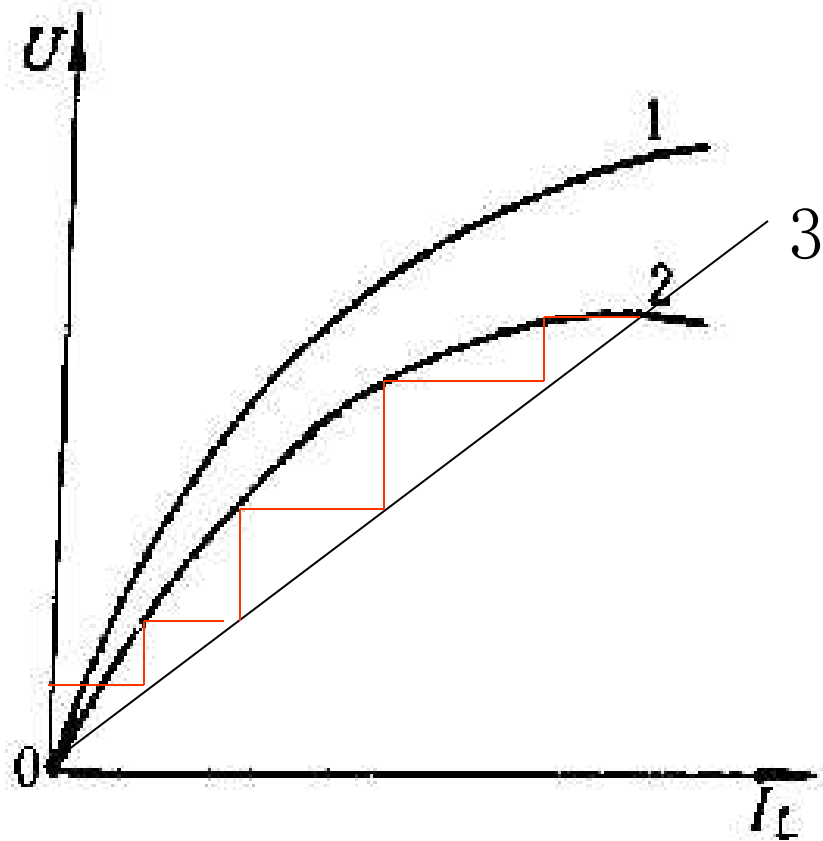
## 串励发电机特性



串励发电机的端电压当负载变化时很大。

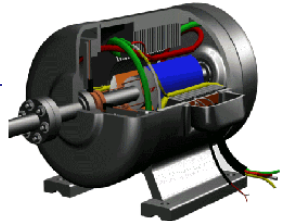
### 电压建立过程

端电压与负载电阻有关，若负载电阻减小，则端电压升高；若负载电阻大于一临界电阻，则电势不能建立。

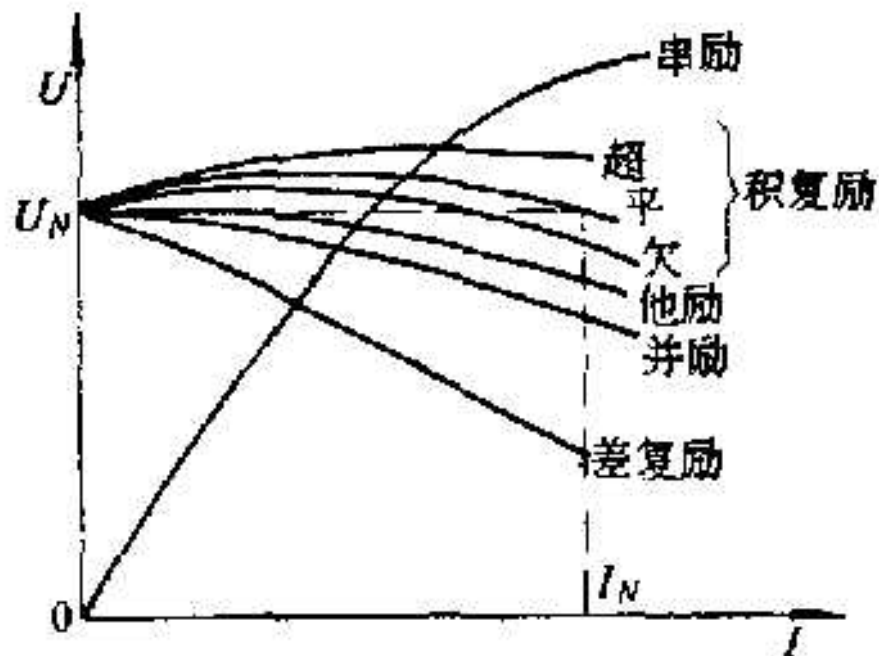
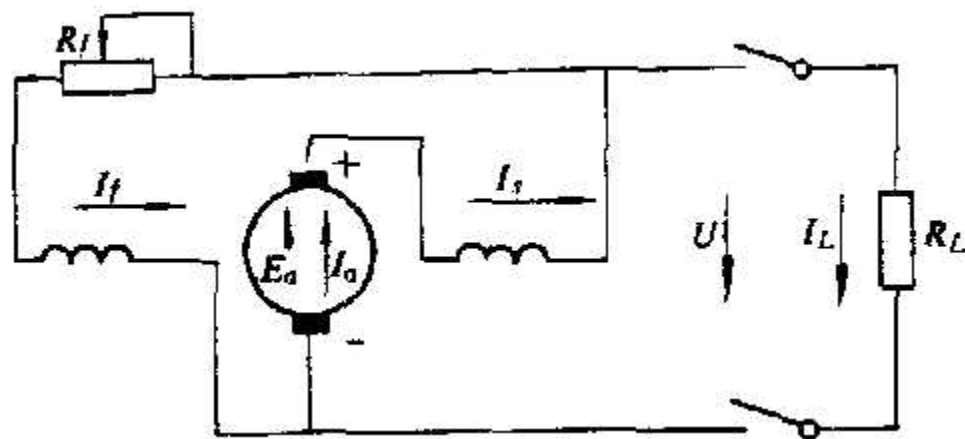


1. 空载特性（另外励磁）
2. 外特性
3. 场阻线（包括外电阻）





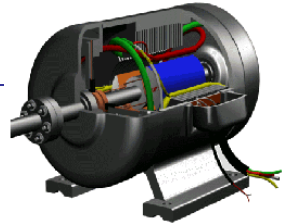
## 复励发电机的特性



复励发电机的外特性界于并励发电机与串励发电机外特性之间。复励的程度决定于串联励磁与并联励磁的相对强度，并联励磁通常要比串联励磁强的多。

有平复励（恰好补偿）、超复励（过补偿）之分。





## 直流电动机的作用原理

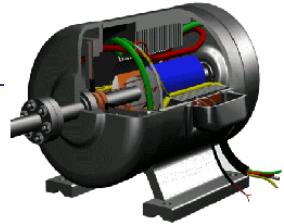
- 电枢绕组和励磁绕组分别施加直流电源。气隙中主磁通与电枢电流相互作用产生电磁转矩，

$$T = \frac{pW}{2\pi a} \Phi I_a = C_T \Phi I_a$$

- 电磁力矩为原动力矩，在电磁力矩的作用下，驱动轴上的机械负载旋转。
- 电枢绕组感应电势为

$$E_a = \frac{p}{a} W \frac{n}{60} \Phi = C_e \Phi n$$





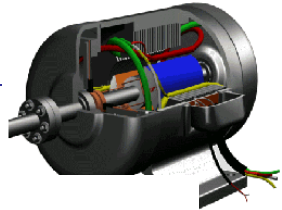
# 直流电动机的机械特性

- 转矩特性  $T = \frac{pW}{2\pi\alpha} \Phi I_a = C_T \Phi I_a$
- 转速特性  $n = \frac{U - I_a \sum r_a - 2\Delta U}{C_e \Phi}$
- 转速与转矩特性（机械特性，T-n曲线）

$$n = \frac{U - 2\Delta U}{C_e \Phi} - \frac{\sum r_a}{C_e \Phi C_T \Phi} T$$

在不同的励磁方式下，主磁通随负载电流的变化不同，导致电机特性的差异。





## 并励电动机的特性

### 如何改变并励电动机的旋转方向：

R： 分别调换励磁绕组或电枢绕组接头。

不能简单地改变电源极性，因而电磁转矩方向与主磁通和电枢电流方向的有关。

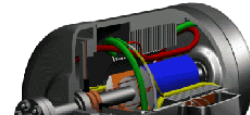
### 1. 转矩特性

励磁电流  $I_f = \frac{U}{\sum r_f} = \text{const}$  不变。

当负载电流很小时，电枢反应的去磁作用很小，近似认为主磁通不变，则  $T = C_T \Phi I_a \propto I_a$

与电枢电流成线性关系。

当负载电流较大时，电枢反应去磁作用使主磁通有所减小，曲线向下弯曲。



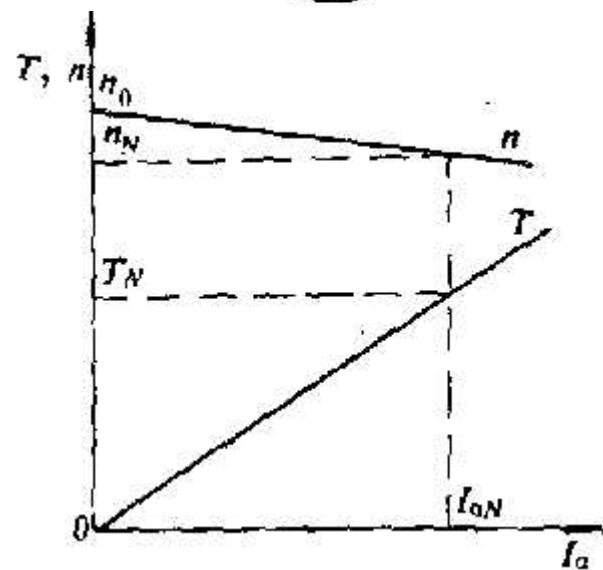
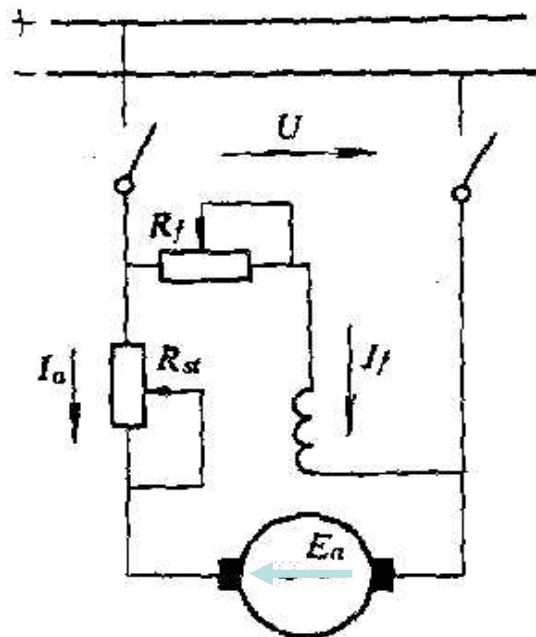
## 2. 转速特性

负载电流增加，电枢电阻压降增大，如不计电枢反应的去磁作用即主磁通不变， $E_a = C_e \phi I_a$ ，则 $n$ 随 $E_a$ 的下降而有所减小，形成向下的机械特性。

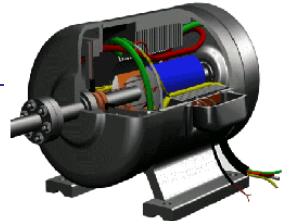
如考虑电枢反应的去磁作用将使每极磁通 $\phi$ 减少，并励电动机的转速变化很小。电阻电压降的影响影响较大，转速特性是略为下倾的。——

——**硬特性**

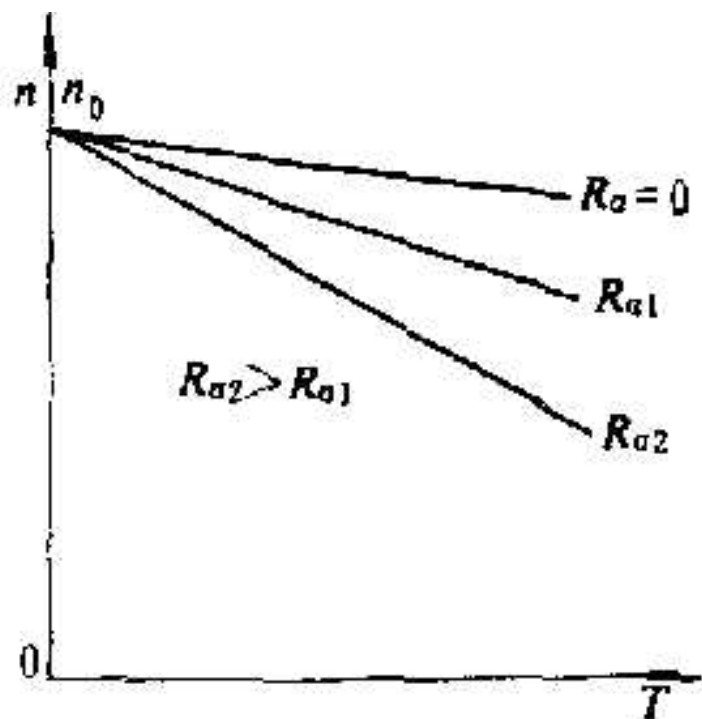
$$n = \frac{U - I_a \sum r_a - 2\Delta U}{C_e \Phi}$$







## 并励电动机的特性



$R_a=0$ 时，称为自然机械特性——硬特性。

增加电枢回路串联电阻，则机械特性变软。

### 3. 机械特性

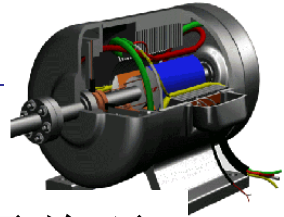
$$n = \frac{U - 2\Delta U}{C_e \Phi} - \frac{\sum r_a}{C_e \Phi C_T \Phi} T$$

主磁通由于负载电流去磁作用的影响随电流增加而略有减小。

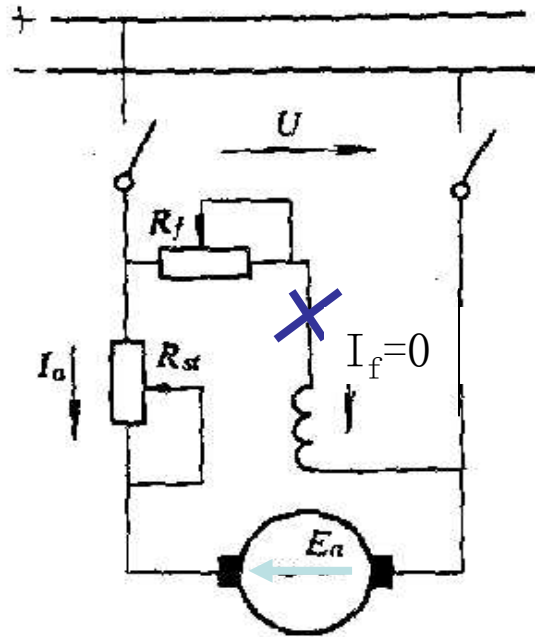
如改变励磁电流，则  $I_f$  越小时，空载转速越高，电机特性越软。

如改变电枢电流（但保持励磁不变）则机械特性为平行的直线， $n_0$  不同，硬度不变。





## 并励电动机励磁失磁的分析



当励磁回路断路时，气隙中的磁通将骤然降至微小的剩磁，电枢回路中的感应电势也将随着减小。

由于惯性，电机速度不能突变，电枢电流将急剧增加，使电动机严重过载。

电磁转矩的变化

(1) 当电枢电流的增加程度不足以补偿每极磁通的减小程度时，电磁转矩减小，因而使电动机减速；

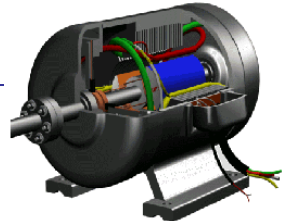
(2) 当电枢电流的增加程度超过每极磁通的减小程度时，电磁转矩将增大，使电动机加速，直至转速上升到危险的高值（达到电压平衡）。

$$E_a = \frac{p}{a} W \frac{n}{60} \Phi = C_e \Phi n$$

$$T = \frac{pW}{2\pi a} \Phi I_a = C_T \Phi I_a$$

$$E_a = U - I_a \sum R - 2\Delta U$$





# 串励电动机的特性

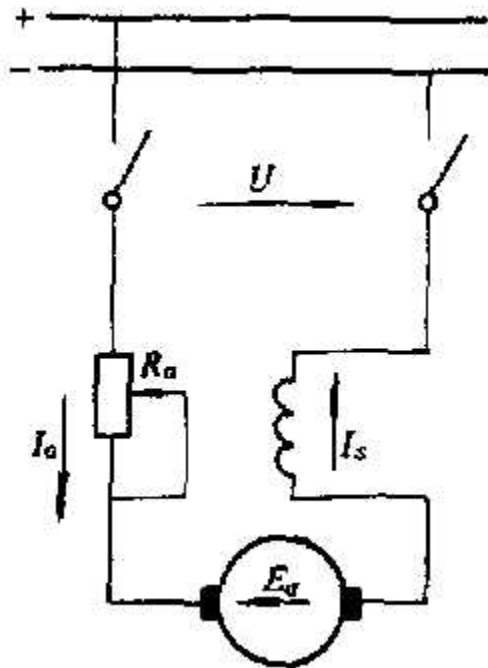
## 1. 转矩特性

一般情况下:  $T \propto I_a^\alpha \quad 1 < \alpha < 2$

- 转矩按大于电流一次方的比例增加, 对起动和过载能力有意义。
- 当负载电流 (即励磁电流) 很小时, 铁心处于不饱和状态, 主磁通随励磁成正比增加, 即  $\Phi = kI_a$

$$T = C_T \Phi I_a = C_T k I_a^2 = \frac{C_T}{k} \Phi^2$$

- 当负载电流较大时, 铁心饱和, 主磁通随励磁变化较小 (近似不变)  $T = C_T \Phi I_a \propto I_a$



$$I = I_f = I_a$$





# 串励电动机的特性

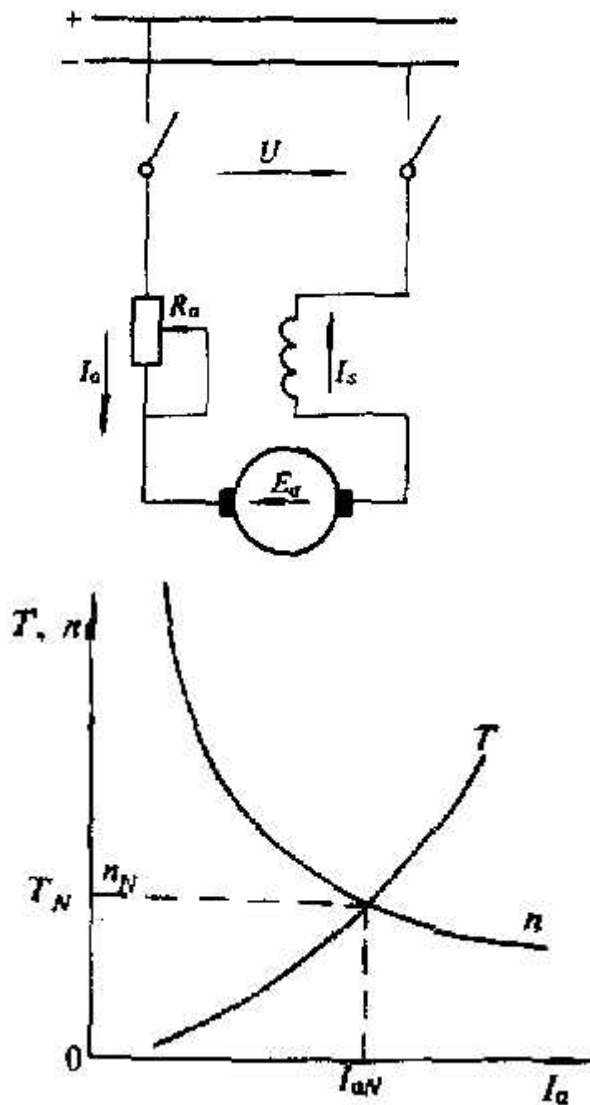
## 2. 转速特性

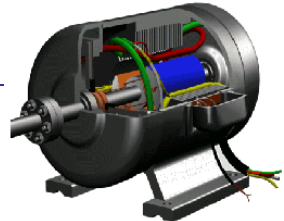
- 负载较小时，励磁小，磁路不饱和，主磁通与电流成正比  $\Phi = kI_a$

$$n = \frac{U - 2\Delta U}{C_e k I_a} - \frac{\sum r_a}{C_e k}$$

- 负载较大，在磁路饱和后，主磁通近似不变，随电流增加转速略有下降

$$n = \frac{U - I_a \sum r_a - 2\Delta U}{C_e \Phi}$$

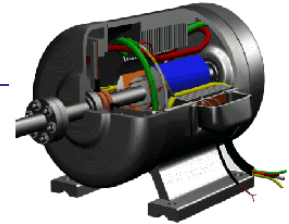




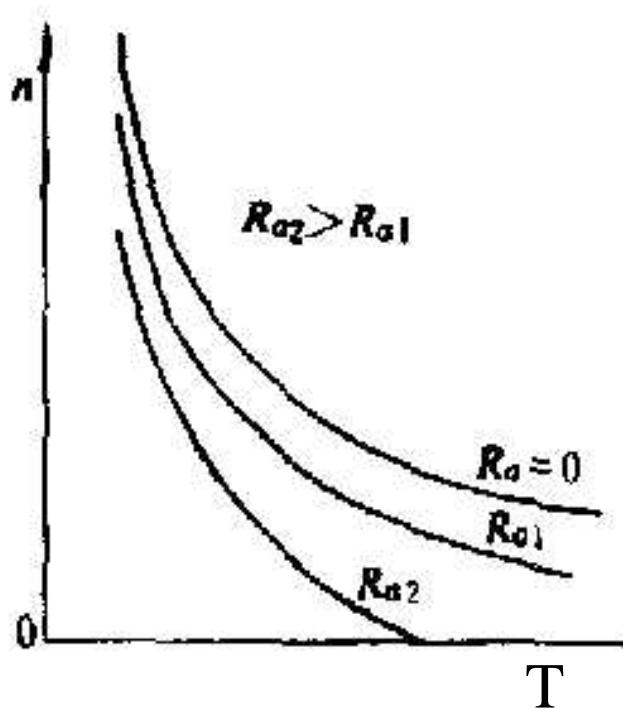
## “飞速”的解释

1. 在满载或较重负载时，电枢电流较大， $I_f=I_a$ 较大，气隙磁通较大，电机只需不太高的转速便能产生较高的反电势与电网电压平衡。
2. 在空载或很轻负载时， $I_f=I_a$ 很小，使主磁通很小，电机必须以很高的转速才能产生反电势保持电压平衡。





## 串励电动机的特性



### 3. 机械特性

$$n = \frac{U - 2\Delta U}{C_e \sqrt{\frac{k}{C_T}} \sqrt{T}} - \frac{\sum r_a}{C_e k} = \frac{U - 2\Delta U}{a\sqrt{T}} - b$$

铁心饱和后

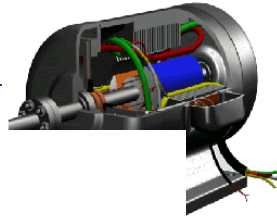
$$n = \frac{U - 2\Delta U}{C_e \Phi} - \frac{\sum r_a}{C_e \Phi C_T \Phi} T$$

在工作范围内，转速随负载电流急剧变化——软特性。

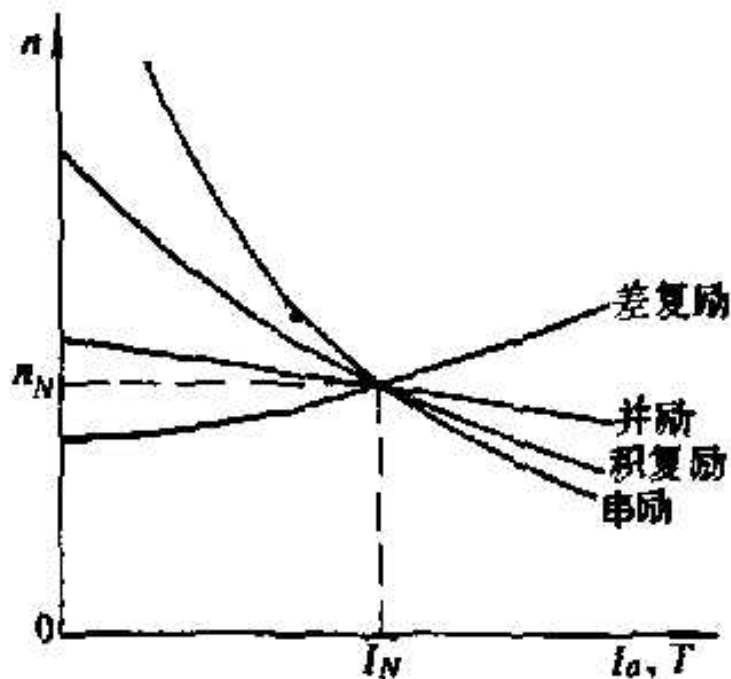
$$\text{转速变化率} = \frac{n_{\left(\frac{1}{4}\right)} - n_N}{n_N}$$

不能在极轻载下运行





## 复励电动机的特性



(a) 转速特性

### 以并励为主的积复励:

当负载转矩突然增加时，电枢电流增大（电枢反应去磁作用增强），串励磁势增加，使主磁通增大。

- ①使电磁转矩很快的增大以克服突然增大的负载转矩；
- ②使反电势很快的增大以减小电枢电流的冲击值。
- ③ 当电枢反应去磁作用很强时，仍能使电机有下降的机械特性，保持其稳定运行。

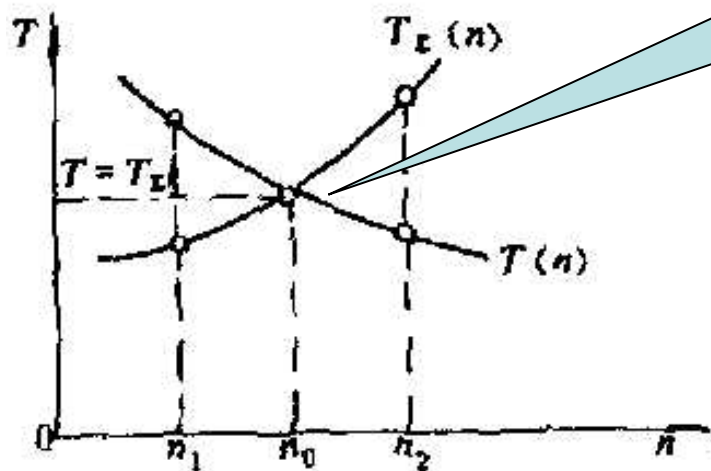
适当地选择并励磁势和串励磁势的相对强弱，可使复励电动机具有负载所需要的特性。



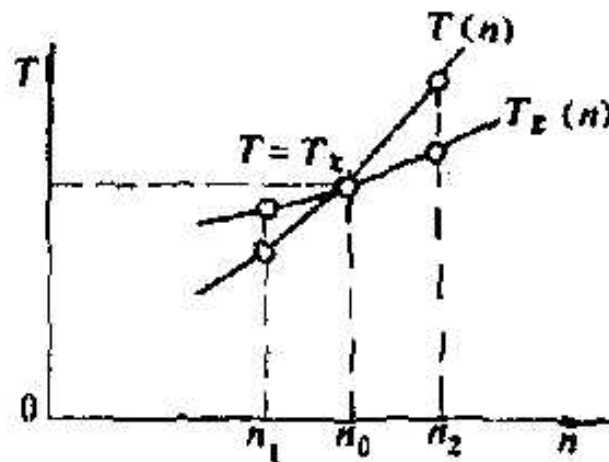


## 电动机稳定运行

在交点处，转速之上则 $T < T_z$ ，  
转速之下则 $T > T_z$



(a) 稳定运行



(b) 不稳定运行

电动机的稳定运行条件

$$\frac{dT}{dn} < \frac{dT_z}{dn}$$

$$\frac{dT}{dn} > \frac{dT_z}{dn}$$

在恒负载转矩条件下，下降的机械特性电动机能稳定运行，上升的机械特性电动机不能稳定运行。



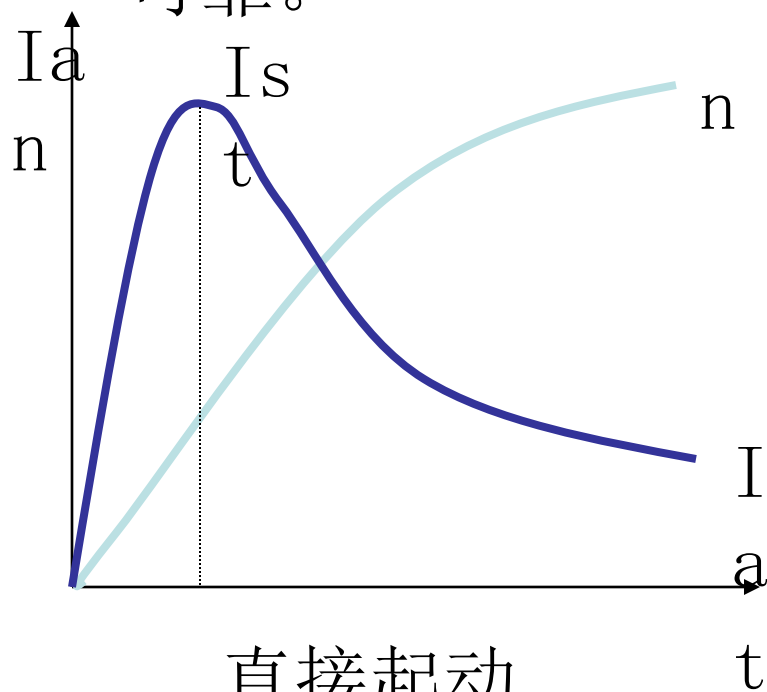




## 直流电动机的起动

### 起动要求:

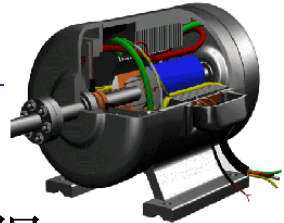
- 足够的起动转矩
- 一定范围的起动电流
- 起动时间符合生产要求、起动设备简单、经济、可靠。



$t=0$ 时,  $n=0$ ,  $E_a=0$ ,  
 $I_a=U/r_a$ 很大 ( $10-50I_N$ ),  
 副作用有: 损坏电枢绕组、  
 导致换向器环火。

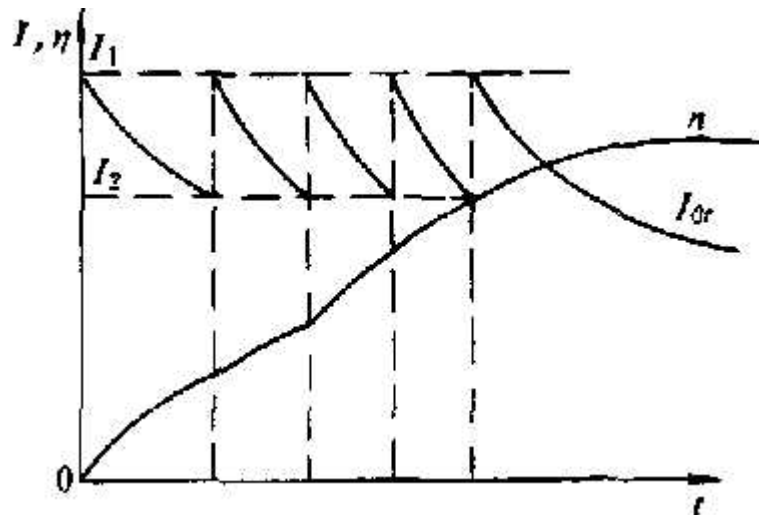
随着速度增加, 反电势增加,  
 电枢电流反而下降。





## 限制起动电流的起动方法

**变阻器起动**——起动时，在电枢回路中串入变阻器，当转速逐渐上升时，可把起动电阻逐级切除。



直流并励电动机起动时，励磁回路中串联的电阻取较小的值：

起动中要求较大的转矩，**励磁回路电阻小，励磁电流大， $\Phi$ 较大，有利起动**。电机起动后，感应电势建立，使起动电流很快减小。

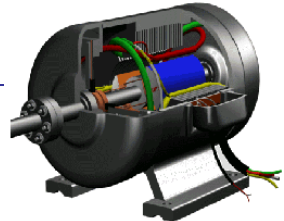




## 降压起动方法

- 一般只适用于大容量频繁起动的直流电动机，须用专门的调压电源。
- 优点：起动电流小，起动消耗能量少，升速比较平稳。
- 在起动过程中，可逐步提升电源电压，使按需要的加速度上升。在实用中，发电机-电动机组即采用降压起动法，其中，发电机及电动机均采用他励，以保证起动时有足够的励磁电流。  
“整流器-电动机”组也采用此方法。





# 直流电动机的调速

- 基本要求：调速幅度宽广、调速连续平滑、损耗小、经济指标高等。

$$n = \frac{U - I_a(r_a + R_a) - 2\Delta U}{C_e \Phi}$$

电枢回路中的串联电阻

- ①调节励磁电流以改变每极磁通  $\Phi$ ；
- ②调节外施电源电压  $U$ ；
- ③电枢回路中引入可调电阻量  $R_a$ 。

## 调速性能：

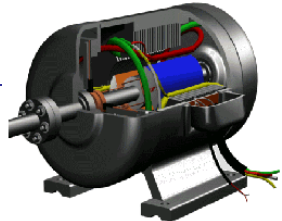
速比：最高与最低速度之比；

平滑性或跳级调速；

经济性：损耗、效率

调速设备简单、可靠、操作方便等。





## 并励电动机的弱磁调速

### 调节励磁电流以改变主磁通 $\Phi$

增加励磁回路中串联电阻 $\sum r_f$

励磁电流减小，主磁通 $\Phi$ 减小

$n$ 不能突变，则 $E = C_e \Phi n$ 减小

$$I_a = \frac{U - E - 2\Delta U}{\sum r_a} \text{ 增大}$$

$T = C_T \Phi I_a$ 增加，电机升速

反电势 $E$ 增加， $I_a$ 减小， $T$ 减小

直至在新的转速下达到转矩平衡

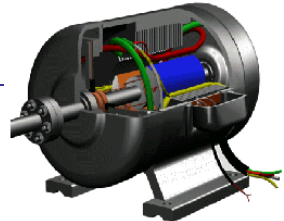
$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{E_2}{E_1} \bullet \frac{\Phi_1}{\Phi_2}$$

当磁路不饱和，且忽略电枢反应的影响和 $I_a r_a$ 后，

$$\frac{n_2}{n_1} \approx \frac{\Phi_1}{\Phi_2} = \frac{I_{f1}}{I_{f2}}$$

(1) 最高转速受机械强度及换向的限制；

(2) 最低转速受励磁绕组本身固有电阻及磁路饱和的限制。



## 调节电源电压调速

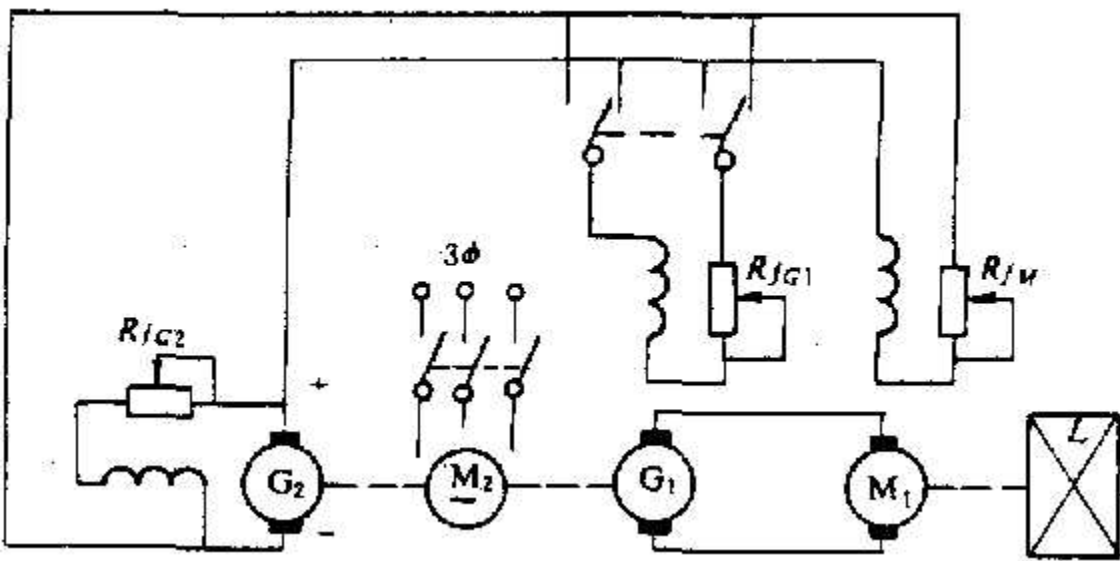
$$n = \frac{U - I_a(r_a + R_a) - 2\Delta U}{C_e \Phi} \approx \frac{U}{C_e \Phi} = kU$$

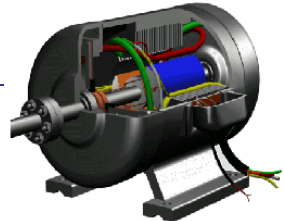
励磁恒定时，  
如他励

- 在很广的范围内平滑调速，且电动机的机械特性硬度保持不变。

可用于串励电动机调速。

在电力牵引机车中，常把两台串励电动机从并联运行改为串联运行，使每台电动机的端电压从全压降为半压。





## 调节可变电阻调速

$$n = \frac{U - I_a(r_a + R_a) - 2\Delta U}{C_e \Phi}$$

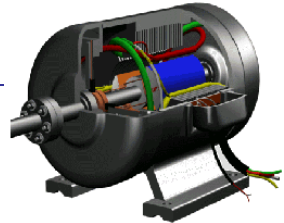
改变电阻 $R_a$ ，即相当于改变了电动机的电枢绕组两端电压。

- 效率低
- 负载转矩较小时，电枢电流小，调节作用不大
- 电动机机械特性变软，使转速变化率增大

一般从调速范围、连续平滑性、调速中电能消耗、设备投资经济性等方面比较各种调速的优缺点。

适用范围主要指适用于恒转矩或恒功率、有级或无级调速、适用与大中型或小型电机等。

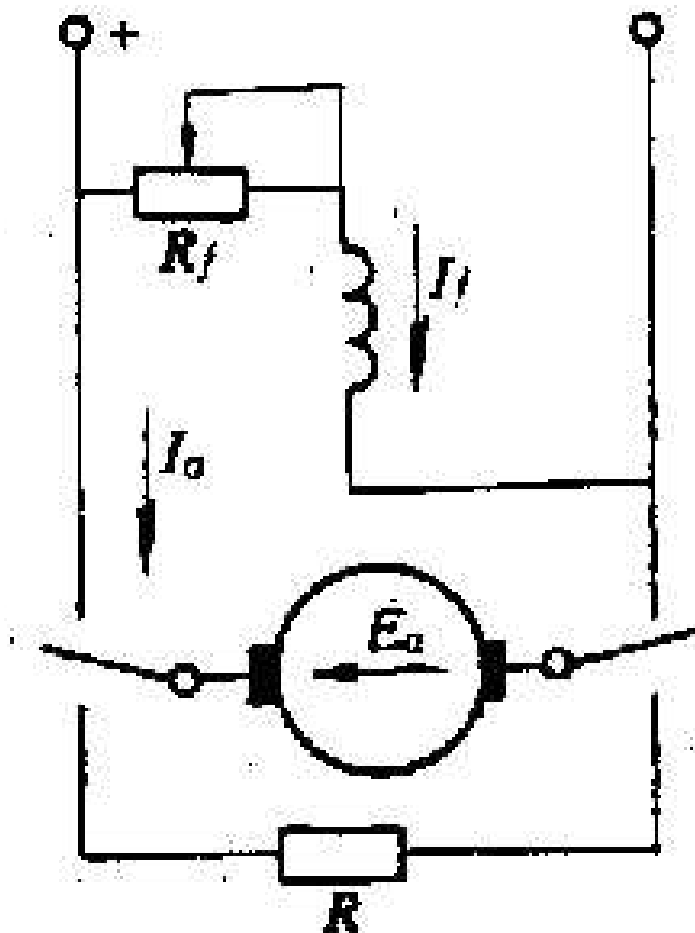




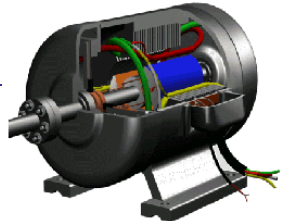
# 直流电动机的制动

即在转动方向产生阻力矩

## 1. 能耗制动







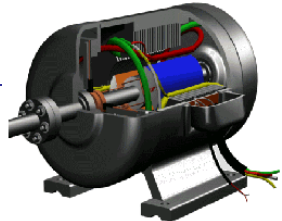
## 2. 回馈制动

当电动机的转速高于某一数值时，电动机的反电势 $E$ 大于电机电源电压，即  $E > U$ ，电枢电流将反向，电机进入发电机的运行状态而起制动作用，可限制转速的持续上升。适用于由串励电动机驱动的升速场合，如电天下坡。

为保证励磁，需将串励绕组改为他励，且施加一定的励磁电压。

此时，机械特性是原特性在第二象限的延伸。



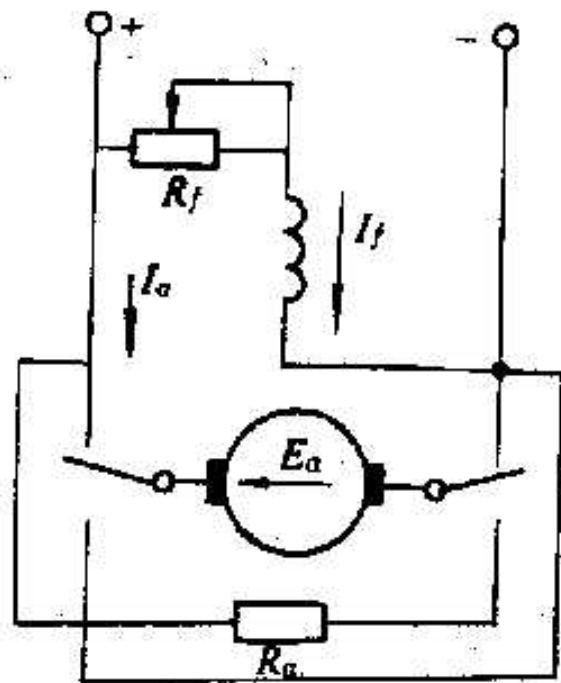


### 3. 反接制动

励磁回路不变，电枢回路反接

$$n = \frac{E}{C_e \Phi} = \frac{-U - I_a(r_a + R_a)}{C_e \Phi}$$

$$= \frac{-U}{C_e \Phi} - \frac{R_a + r_a}{C_e C_T \Phi^2} T_M'$$



### 制动机械特性

当转速为零时，制动转矩不为零，应及时将电源切除，否则将反转。

